

**Untersuchungen über die Abhängigkeit
der „Arbeitshyperämie“
der Skelettmuskulatur des Menschen
von der Ruhedurchblutung**

Rainer Huth

1964

Aus dem Institut für animalische Physiologie der
Universität Frankfurt am Main
(Direktor: Prof. Dr. K. Wezler)

Untersuchungen über die Abhängigkeit der
"Arbeitshyperämie" der Skelettmuskulatur des
Menschen von der Ruhedurchblutung

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin
der Hohen Medizinischen Fakultät
der Johann Wolfgang Goethe-Universität
zu Frankfurt am Main

vorgelegt von
Rainer Huth
aus Flörsheim am Main

Frankfurt/Main 1964

Dekan : Prof. Dr. J. Frey

Referent : Prof. Dr. W. Schroeder

Korreferent : Prof. Dr. K. Pirlet

Mündliche Prüfung : 24. April 1964



Aufgrund von Untersuchungen an narkotisierten Tieren wurde lange Zeit angenommen, daß die Durchblutung des Skelettmuskels genau seinen Bedürfnissen, also seiner jeweiligen Belastung angepaßt und im ruhenden Zustande minimal sei, weil die geringste Drosselung der Muskeldurchblutung schon zu einer Ermüdung führte (Rein, 1942).

Bereits 1942 konnten Große-Brockhoff, Rein und Schoedel aber zeigen, daß die Durchblutung des bei geringster Belastung isotonisch arbeitenden Muskels sozusagen überschüssig ist. Sie konnte künstlich durch mechanische Drosselung des arteriellen Zustromes bis zu 40 % herabgesetzt werden, ohne daß dadurch die Muskelleistung abfiel. Erst mit steigender Belastung wurde die Durchblutung eben ausreichend und unter Umständen sogar ungenügend, so daß rasche Ermüdung eintrat. Eine arterielle Hypoxaemie verminderte rasch die gesamte "Durchblutungstoleranz".

Diese Untersuchungen beweisen, daß die Durchblutung des ruhenden Muskels nicht "minimal" zu sein braucht. Untersuchungen der letzten 10 Jahre haben nun weiter gezeigt, daß die Ruhedurchblutungswerte der Skelettmuskulatur (Unterarm) des wachen Menschen nicht nur bei verschiedenen Personen, sondern auch bei der gleichen Person außerordentlich stark schwanken können. Bei verschiedenen Personen kann das Verhältnis der Ruhedurchblutung unter konstanten Versuchsbedingungen 1 : 9 betragen und bei der gleichen Versuchsperson

kann ein Verhältnis von 1 : 5 und mehr gefunden werden (Schroeder 1963) d.h., die Durchblutung der Unterarmmuskulatur kann in Ruhe zwischen 1 und 9 ml/min/100 ml Gewebe schwanken, wie aus den Untersuchungsergebnissen verschiedener Autoren (Tab. 1) hervorgeht. Diese Befunde werfen die Frage auf, ob die unterschiedlich große Ruhedurchblutung auch die Größe der Arbeitsdurchblutung beeinflusst, d. h. ob die Größe der "Arbeitshyperaemie" bei einer bestimmten Muskelarbeit von der Größe der Ruhedurchblutung abhängt, oder unabhängig von der Ruhedurchblutung (bei gleicher Arbeit) konstant ist.

Untersuchungen über die Abhängigkeit der Arbeitshyperaemie von der zufällig gerade bestehenden Ruhedurchblutung scheinen bisher noch nicht vorgenommen worden zu sein. Es gibt lediglich eine Untersuchung von Dean und Skinner (1960) über die Arbeitshyperaemie der Unterarmmuskulatur, deren Durchblutung durch passives Heben bzw. Senken der unteren Extremität und des Stammes vergrößert oder verkleinert worden war. Diese Autoren fanden, daß Größe und Rückgang der Arbeitshyperaemie nach rhythmischen und submaximalen, anhaltenden Kontraktionen unabhängig von der Ausgangsdurchblutung waren. Als Erklärung stellten sie zur Diskussion, daß entweder die für die Arbeitshyperaemie verantwortlichen Stoffwechselprodukte durch einen Mechanismus entfernt werden, der unabhängig von der Gesamtdurchblutung ist, oder daß

die Durchblutungssteigerung bei passivem Erheben der Extremitäten durch arterio-venöse Blutkanäle erfolgt, welche nicht an dem Abtransport der Stoffwechselprodukte beteiligt sind.

Das gleiche Problem war zwar schon vorher untersucht worden, wobei die Ausgangsdurchblutung des Armes entweder durch indirekte Erwärmung (Barcroft und Mitarbeiter) oder durch intravasale Zufuhr von Adrenalin, Acetylcholin, Adenosintriphosphat bzw. Histamin erhöht worden war (Dornhorst und Whelan 1953, Patterson und Shepherd 1954). Diese Versuche sind aber wenig beweisend, weil durch die Wärme und durch einen Teil der gefäßwirksamen Substanzen auch die Hautgefäße erweitert werden.

Die starke Streuung der Ruhedurchblutungswerte der Unterarmmuskulatur wird durch die Befunde verschiedener Untersucher belegt (Tab. 1). Alle Bestimmungen dieser Tabelle wurden mittels der Venenverschlußplethysmographie bei Zimmertemperaturen zwischen 15°- 25°C (Badetemperatur 32°C) durchgeführt. Bis auf die Untersuchungen von Cooper und Mitarbeiter, sowie Schroeder, handelt es sich um die Durchblutungswerte des gesamten Unterarmes (Muskulatur und Haut) ohne Hand (Segmentplethysmographie). In den Untersuchungen von Cooper wurde die Hautdurchblutung durch Adrenaliniontophorese ausgeschaltet, während Schroeder die Durchblutung im oberen Drittel des Unterarmes bestimmte, dessen Hautanteil weniger als 15 % beträgt (s. Methodik).

Ergebnisse von Durchblutungsmessungen der Unterarmmuskulatur
in ml/min/100 ml Gewebe

Autoren	Schwankungs- breite	Mittel- werte	<u>Zahl d. Messg.</u> Personen	Literatur- stelle
Abramson, D.I. H. Zazeela u. J. Marrus (1939)	1,5-2,5	1,80	-	*
Abramson, D.I. u. S.M. Fierst (1942)	0,4-3,2	1,80	-	*
Abramson, D.I. A. Kahn, S. Tuck, G.A. Turman, H. Rejal u. C.J. Fleischer (1958)	1,6-4,8	2,6	-	*
Abramson, D. I. S. Tuck, A. M. Zayas u. R. E. Mitchell (1962)	0,8-3,8	1,8	19/19	J. Appl. Phys. <u>17</u> , 191 - 194
Barcroft, H. u. O. G. Edholm (1943, 1946)	1,2-3,0	2,3	-	J. Physiol. Brit. <u>102</u> , 5 - 20 u. <u>104</u> , 366 - 376
Barcroft, H. u. O. G. Edholm (1943)	1,9-3,8 1,5-7,0	2,7 4,2	-/5 -	J. Physiol. Brit. <u>102</u> , 5 - 20

* Zitiert aus: Handbook of Circulation p. 64 - 65 (Philadelphia, Saunders 1960)

Fortsetzung Tab. 1

Autoren	Schwankungs- breite	Mittel- werte	<u>Zahl d. Messg.</u> Personen	Literatur- stelle
Cooper, K.E., O.G. Edholm u. R.F. Mottram (1955)	1,8-9,6	-	31/31	J. Physiol. Brit. <u>128</u> , 258 - 267
Müller, E.A. u. Heising (1953)	2,6-7,4	4,1	16/4	Arbeitsphysiol. <u>15</u> , 134 - 138
Schroeder, W. (1963)	0,75-5,3	2,65	119/14	Z. ges. exp. Med. <u>137</u> , 1-11

Methodik zu quantitativen Durchblutungsmessungen der Extremitätenmuskulatur

Die einzige Methodik zur quantitativen Messung der Durchblutung der Extremitätenmuskulatur ist die Venenverschlußplethysmographie (Brodie und Russel 1905, Hewlett und van Zwaluwenburg 1909, Grant und Pearson 1938, Barcroft und Swan 1953).

Bei der originalen Methodik wird die zu untersuchende Extremität, z. B. der Unterarm, luftdicht in einen Metall- oder Glaszylinder eingeschlossen, der durch einen Schlauch mit einer Marey'schen Kapsel verbunden ist. Jede Veränderung der Blutmenge im Unterarm führt zu einer entsprechenden Änderung des Armvolumens, welche durch die Marey'sche Kapsel angezeigt bzw. aufgeschrieben wird. Quantitativ wird die Extremitätendurchblutung durch Unterbrechung des venösen Abflusses mit einer Staumanschette (Staudruck 70 mm Hg) am Oberarm bzw. Oberschenkel ermittelt, da die Zunahme des Extremitätenvolumens während der Unterbrechung des venösen Abflusses der Größe des arteriellen Zustromes entsprechen muß. Die Venenverschlußplethysmographie kann aber nur die Durchblutung des gesamten eingeschlossenen Gewebes in ml/min/100 ml Gewebe messen d. h., es wird gleichzeitig mit der Muskel- auch die Hautdurchblutung erfaßt. Um den Einfluß der Hautdurchblutung, insbesondere der Haut der Hand, zu verringern, benutzt man heute meist einen Segmentplethysmographen, in den nur der Unterarm eingeschlos-

sen ist, und unterbricht gleichzeitig die Blutzufuhr zur Hand mit einer arteriellen Staumanschette am Handgelenk (Modifikationen der Methodik s. bei Dittmar).

Nach Grant und Pearson soll mit der Segmentplethysmographie vorwiegend die Durchblutung der Skelettmuskulatur gemessen werden, weil am Unterarm das Verhältnis von Haut- zu Muskelgewebe durchschnittlich 1 : 7,4 beträgt. Der Hautanteil spielt sicherlich bei der Bestimmung der Ruinedurchblutung der Skelettmuskulatur keine Rolle, wenn die Messung bei kühler Umgebungstemperatur vorgenommen wird (18° - 20° C), da bei Zimmertemperatur die Hautdurchblutung größenordnungsmäßig der Muskeldurchblutung entspricht (Ferris und Mitarbeiter). Die Meßergebnisse können aber nicht auf eine Veränderung der Muskeldurchblutung bezogen werden, wenn gleichzeitig die Haut direkt oder indirekt erwärmt wird, oder wenn die Wirkung von Substanzen auf die Muskeldurchblutung untersucht wird, welche ebenfalls die Hautgefäße beeinflussen. Um den Einfluß der Hautdurchblutung bei der Messung der Muskeldurchblutung noch weiter auszuschalten, wurde von Schroeder eine Modifikation der Venenverschlußplethysmographie entwickelt, welche die Durchblutung im oberen Drittel des Unterarmes zu messen gestattet. In diesem dicksten Teil des Unterarmes ist das Verhältnis von Haut- zu Muskelgewebe für die Messung am günstigsten (Eine Weiterentwicklung der für die eigenen Untersuchungen benützten Methodik wurde von Schroeder 1963 publiziert).

Beschreibung der für die eigenen Untersuchungen verwendeten
Methodik zur quantitativen Durchblutungsmessung der Extremitätenmuskulatur nach S c h r o e d e r

Bei der Methodik von Schroeder wird - im Gegensatz zur originalen Venenverschlußplethysmographie - während der Unterbrechung des venösen Rückstromes nicht die Volumenzunahme, sondern die Druckzunahme im Gewebe bei entspannten Wänden der Niederdruckgefäße registriert. Die Durchblutungsgröße kann dann aus der Druckzunahme während der Meßzeit und der anschließend durch ein Eichvolumen ermittelten Volumenelastizität berechnet werden.

Bei der praktischen Ausführung der Durchblutungsmessung wurde das Armgewebe im oberen Drittel des Unterarmes durch ein 45 mm breites und 0,1 mm starkes Metallband mit einem Druck von 35 mm Hg (=Entlastungsdruck der Niederdruckgefäße) umfaßt. Dieser Druck entspannt die Wände der Kapillaren, Venolen und Venen. Hierdurch wird verhindert, daß bei der zunehmenden Füllung während der venösen Abflußdrosselung (Meßzeit) die Gefäßwände der Niederdruckgefäße unter eine zunehmende Spannung geraten. Die zunehmende Füllung soll nur den Druck des im Metallband eingeschlossenen Gewebes erhöhen. Da die Volumenelastizität ($\Delta P / \Delta V$) des Armgewebes in dem Druckbereich von 35 - 40 mm Hg relativ konstant ist, erhält man eine über viele Pulse gerade Meßkurve im Gegensatz zur originalen Venenverschlußplethysmographie, deren Meßkurven infolge der

druckabhängigen Volumenelastizität der Gefäße, insbesondere bei der Endplethysmographie, gekrümmt sind (s. Rossberg und Baier).

Das für die eigenen Untersuchungen benutzte Metallband mit Druckmeßkopf hatte folgenden Aufbau (Abb. 1). Das unterteilte Metallband ist beiderseits an einem U-förmigen Metallbügel (a) befestigt, in dem sich eine 3,5 x 4,5 cm große Metallplatte (b) mit einem pneumatischen Druckkopf befindet. Die Metallplatte trägt in ihrer Mitte eine Führungsstange (c), mit der dieselbe in dem Führungszyylinder des U-förmigen Metallbügels um 1,0 mm in radialer Richtung zur Armmitte bewegt werden kann. Diese Bewegung ist für die Ermittlung der "Eichzacke" notwendig und wird pneumatisch (durch manuelle Kompression eines Gummiballes über einen runden Kunststoffbeutel (d)) ausgelöst, welcher auf eine am oberen Ende der Führungsstange befindliche runde Metallplatte (e) drückt. Die Metallplatte (b) ist als pneumatischer Druckmeßkopf ausgebildet. Ihre Unterseite ist durch eine spannungslose, an den Rändern verklebte Kunststoffmembran (k) verschlossen. In den hierdurch gebildeten Spalt wird durch den Eingangsschlauchstutzen (f_1) ein konstanter Luftstrom geleitet, welcher durch die Austrittsöffnung (1,5 mm Ø) (f_2) ins Freie tritt. Der Abstrom der Luft an der Ausgangsöffnung wird proportional zum Gewebedruck durch die sich anpressende Kunststoffmembran gedrosselt. Bei Änderungen des Gewebedruckes kommt es auf diese Weise zu gleichgroßen Druckänderungen in der Zuflußleitung des Luftstromes, welche mit Hilfe eines

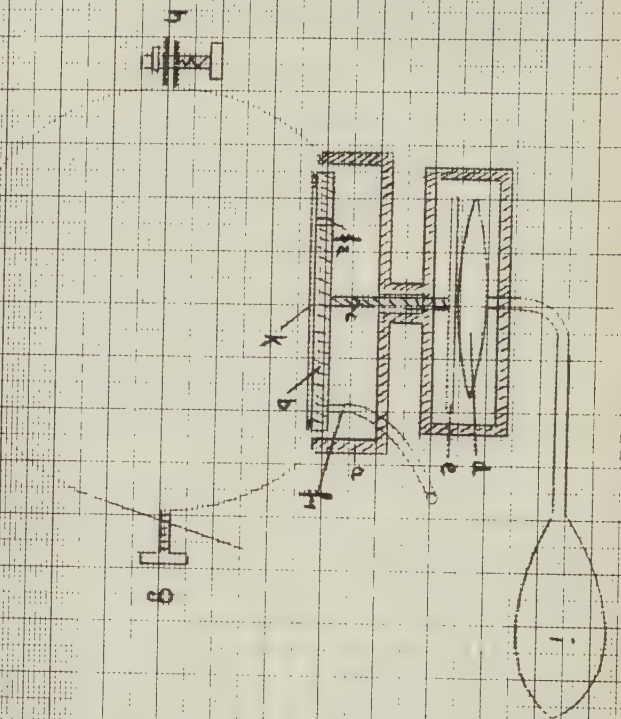


Abb. 4

Metallband mit Druckmembran

a = U-förmiger Metallbügel

b = Metallplatte (12,5 x 4,5)

c = Führungstange

d = Kunststoffbeutel

e = runde Metallplatte

f = Eingangsschlauchstutzen f_2 = Ausstoßöffnung

g = Schraube zur Anpassung der Bandlänge an den Formumfang

h = Druckausgleichsfeder

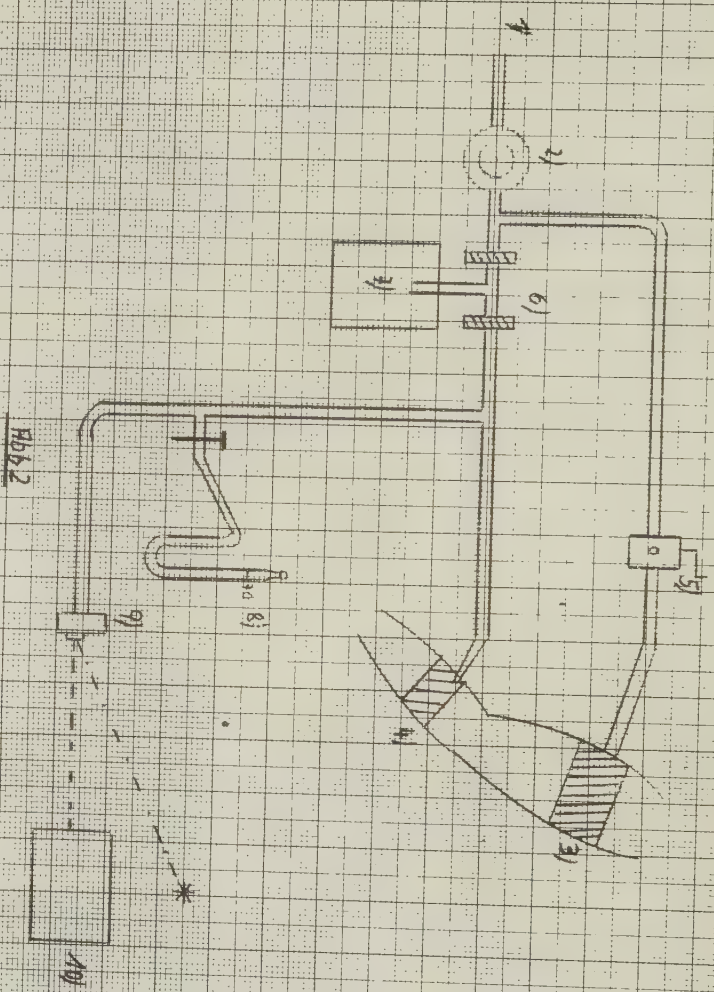
i = Gummiball

K = Kunststoffmembran

optischen Membranmanometers auf ein Photokymographion aufgezeichnet werden.

Das Metallband hat bei (g) eine Schraube zur Anpassung der Bandlänge an den Armumfang und bei (h) eine Druckausgleichsfeder, welche eine weitgehende Verlängerung des Metallbandes während der Muskelkontraktion erlaubt. Diese Feder verhindert einen Anstieg des Gewebedruckes über 50 mm Hg während der Muskelkontraktion.

Die vollständige Versuchsanordnung zeigt die Abbildung 2. Das Druckgas wurde einer O₂-Flasche (1) entnommen. Es strömte durch einen Druckminderer (2), dessen Ausgangsdruck auf 70 mm Hg eingestellt war (=Druck für venöse Drosselung am Oberarm), in ein T-Stück und von dort zur Oberarmmanschette (3) bzw. zur Unterarmpelotte (4). In die Leitung zur Oberarmmanschette war ein Dreiwegehahn zur Füllung und Entleerung der Oberarmmanschette eingebaut. In der Leitung zur Unterarmpelotte befanden sich 2 Strömungswiderstände (6), welche den Gasstrom auf einen konstanten Wert von etwa 1 L/min. reduzierten, sowie ein Windkessel (7) von 10 L (zwischen den Strömungswiderständen). Der Windkessel verhinderte einen vorübergehenden Abfall des registrierten Druckes beim Füllen der Armmanschette. Hinter dem zweiten Strömungswiderstand führte eine Abzweigung sowohl zu einem abschaltbaren Hg-Manometer (8) als auch zu einem optischen Membranmanometers (9), dessen Ausschläge den Druckänderungen in der Leitung zur Unterarmpelotte proportional waren und mit Hilfe eines Photokymographions (10) aufgeschrieben wurden.



Ver suchsan ordnung (Bezeichnungen siehe Text)

Versuchspersonen, Durchführung der Versuche und
Auswertung der Meßkurven

Um individuelle Reaktionsformen einer größeren Zahl von Versuchspersonen auszuschließen, wurden alle Versuche an zwei männlichen Versuchspersonen (K. und R.), Studenten, beide 25 Jahre alt, durchgeführt. Bei beiden Versuchspersonen wurden nach längerer - durch den Aufbau der Meßapparatur und durch methodische Schwierigkeiten bedingten - Anlaufzeit in wiederholten Bestimmungen, die im wesentlichen innerhalb von drei Monaten erfolgten, die Ruhedurchblutung und die Arbeitsdurchblutung nach gleicher Arbeitsleistung gemessen. Beide Versuchspersonen unterschieden sich durch ihre Ruhedurchblutungs-
werte der Unterarmmuskulatur. Die Durchblutung betrug bei Vp. K. im Mittel 7,6 und bei Vp. R. im Mittel 4,9 ml/min/100 ml Gewebe. Alle Versuche wurden am rechten Unterarm der bequem sitzenden Versuchsperson durchgeführt, wobei der Unterarm etwa in Herzhöhe horizontal gelagert worden war. Um den Druck des Armgewichtes auf die Meßpelotte zu vermeiden, wurde darauf geachtet, daß der Unterarm nur am Ellenbogen- und Handgelenk (mit Hand) unterstützt war. Nach einer Ruheperiode von etwa 15 Minuten wurde die Pelotte angelegt und 5 - 10 Minuten später die Ruhedurchblutung 2 - 5 Mal im Abstand von 3 Minuten bestimmt und anschließend die Arbeitsdurchblutung gemessen.

Als Arbeitsform wurde die Kompression eines luftgefüllten Gummiballons (Oberfläche 100 cm^2) gegen einen Druck von

0,5 Atm., gewählt (etwa 30 - 40 % der maximalen Muskelkontraktion). Dieser Druck konnte an einem Zeigermanometer abgelesen werden, das mit dem Gummiballon durch einen Schlauch verbunden war. Jede Arbeitsbelastung bestand aus 20 Kontraktionen innerhalb einer Minute. Die Durchblutung wurde in der ersten Minute nach Beendigung der Arbeit gemessen. Bei jeder Untersuchung wurden 2 - 4 Arbeitsbelastungen durchgeführt. Nach Anlegen der Pelotte (der Druckmeßkopf lag stets an gleicher Stelle: innen auf den Weichteilen der Beugeseite) wurde das Metallband durch die Schraube (g) soweit angezogen, bis durch das an die Luftleitung angeschlossene Hg-Manometer ein Druck von 35 mm Hg angezeigt wurde. Die gleiche Druckhöhe (=Entlastungsdruck) herrschte jetzt auch im eingeschlossenen Gewebe, da der pneumatische Druckkopf den Gewebedruck zum Luftleitungsdruck 1 : 1 übertrug. Dieser Entlastungsdruck wurde vor jeder Messung kontrolliert und eventuell berichtigt. Mit der venösen Stauung am Oberarm durch Aufblasen der Oberarmmanschette auf einen Druck von 70 mm Hg (Umlegen des Dreiwegehahnes) stieg die registrierte Kurve mit einer Geschwindigkeit an, die der arteriellen Zuflußgeschwindigkeit proportional war. Nach etwa 10 - 15 Pulsen (bei normalen Durchblutungswerten) wurde der Druck in der Oberarmmanschette durch Zurückstellen des Dreiwegehahnes wieder gesenkt, wodurch auch die Meßkurve wieder abfiel. Nach der Korrektur des Entlastungsdruckes erfolgte die Volumeneichung (Ermittlung der Eichzacke), indem die Metallplatte (b) durch Druck auf den Gummi-

ball 1,0 mm armwärts vorgeschoben wurde. Durch die Bewegung der Metallplatte wurde das Volumen des eingeschlossenen Armgewebes um das Eichvolumen $= 35 \times 45 \times 1,0 \text{ mm}^3 = 1580 \text{ mm}^3$ oder 1,58 ml erhöht. Die hierdurch ausgelöste Druckerhöhung ist die "Eichzacke". Nach 3 - 4 Pulsen wurde der Gummiballon wieder entlastet, wodurch die Eichkurve wieder absank. Als "Eichzacke" wurde der Abstand vom letzten diastolischen Druck zum ersten diastolischen Druck nach der Druckentlastung (nach Zurücknahme des Eichvolumens) verwendet.

Für die Bewertung der Armdurchblutung wurde die Zeit ermittelt, in welcher die Meßkurve auf die Höhe der Eichzacke angestiegen war (s. Abb. 3). Vorher wurden die diastolischen Druckwerte durch eine Gerade miteinander verbunden. Im Versuch der Abbildung 3 (Arbeitsversuch!) stieg die Meßkurve in 3,25 Sekunden auf die Höhe der Eichzacke d. h., die Durchblutung des in der Meßapparatur eingeschlossenen Armvolumens betrug $\frac{1,58 \text{ ml} \times 60 \text{ sec}}{3,25 \text{ sec}} = 29,1 \text{ ml/min}$. Für die Berechnung des Durchblutungswertes pro 100 ml Gewebe wurde dieser Wert jeweils durch das Volumen des ~~im~~ ⁱⁿ Meßgerät eingeschlossenen Gewebes dividiert, welches aus dem Armumfang an der Meßstelle und der Pelottenbreite berechnet worden war. Im Beispiel der Abbildung 3 betrug der Armumfang ($2\pi r$) 26 cm, r also 4,13 cm. Das Volumen hieraus war $\pi r^2 \times 4,5 = 240 \text{ ml}$ und der endgültige Durchblutungswert $\frac{29,1 \times 100}{240} = 12,1 \text{ ml/min/100 ml Gewebe}$. Dieser Wert bezieht sich auf die Durchblutung von Hautmuskulgewebe, in dem der Muskelanteil über 85 % und der Hautanteil unter 15 % liegen.

Abb 3



Meßkurve

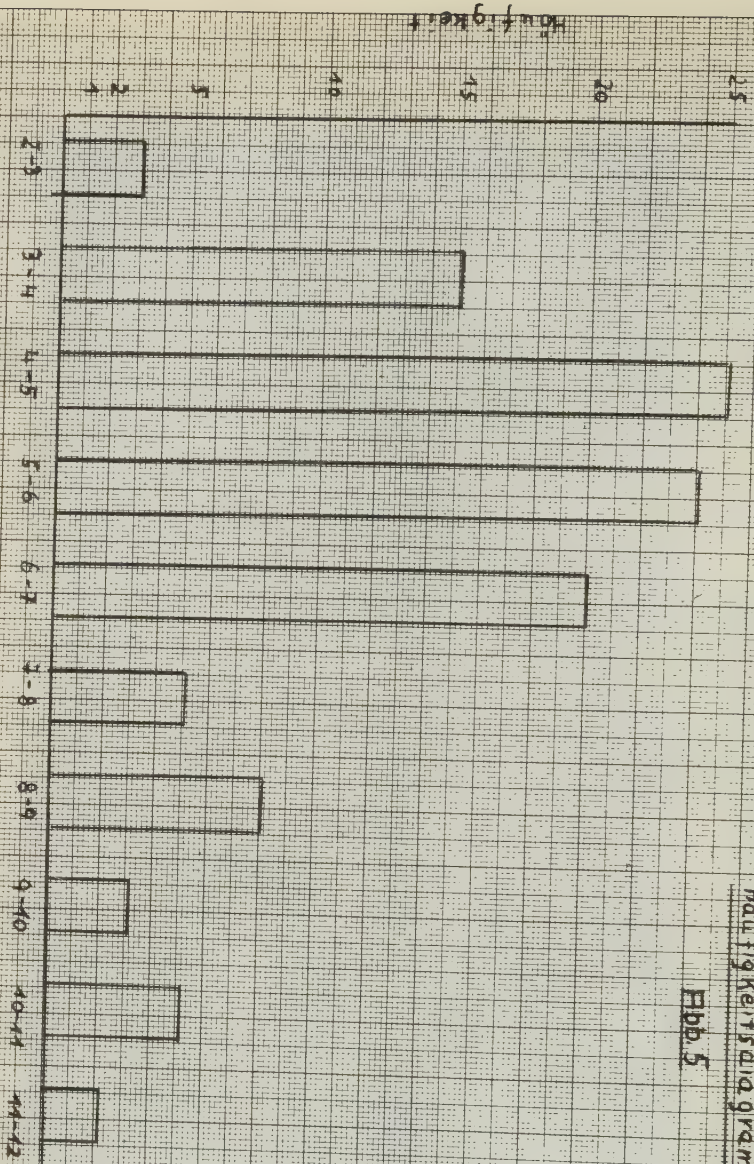
Eichkurve

Versuchsergebnisse

In dem Häufigkeitsdiagramm sind die an verschiedenen Tagen der Untersuchungsperiode bei der Versuchsperson K. ermittelten Ruhedurchblutungswerte dargestellt. Sie lassen die gleiche starke Streuung erkennen, die bereits von anderen Autoren festgestellt worden ist (s. Tabelle 1). Die am gleichen Tag im Abstand von wenigen Minuten ermittelten Durchblutungswerte differieren aber nur verhältnismäßig wenig (< als 25 %). Die Arbeitsdurchblutungswerte der verschiedenen Versuchstage weisen dagegen größere Unterschiede als die entsprechenden Ruhedurchblutungswerte auf (s. Tabelle 2). Die Mittelwerte der Arbeitsdurchblutung der einzelnen Versuchstage streuen so stark, daß man keine Beziehung zwischen diesen Werten und den zugehörigen Mittelwerten der Ruhedurchblutung erkennen kann (s. Tabelle 2). Bei der Versuchsperson R., mit der im Vergleich zu Versuchsperson K. geringeren Ruhedurchblutung, nimmt die Durchblutung durch die Arbeit im Mittel um 106 % gegenüber der Ausgangsdurchblutung zu, während bei der Versuchsperson K. mit der höheren Ruhedurchblutung die Arbeitszunahme im Mittel nur 17 „ beträgt. Bei der Versuchsperson K. (Tabelle 2) ist im Mittel aller Versuche die Zunahme der Arbeitsdurchblutung absolut und prozentual gegenüber der Ruhedurchblutung geringer als bei der Versuchsperson R. (Tabelle 3).

Häufigkeitsdiagramm

Abb. 5



Runddurchbohrung (Vp R) in ml/min / 100 cm³ Gewebe

Tab. 2

Messungsergebnis an Versuchsperson K in ml/min/100 cm³ Gewebe

Versuche	Durchschnitts- werte der Ruhe- durchblutung	Durchschnittswerte der Durchblutung nach Muskularbeit	Zunahme der Durch- blutung nach Muskularbeit
12. 1.62	5,35	6,75	+1,4
25. 1.62	6,5	9,16	+2,66
24.11.61	6,6	5,94	-0,66
15.12.61	6,9	11,8	+4,9
15. 1.62	7,05	7,73	+0,68
11.12.61	7,2	7,05	-0,15
23.11.61	7,5	7,76	+0,26
17.11.61	8,28	8,37	+0,09
28.12.61	10,05	11,3	+1,25
4.12.61	10,8	13,42	+2,62

Tab. 3

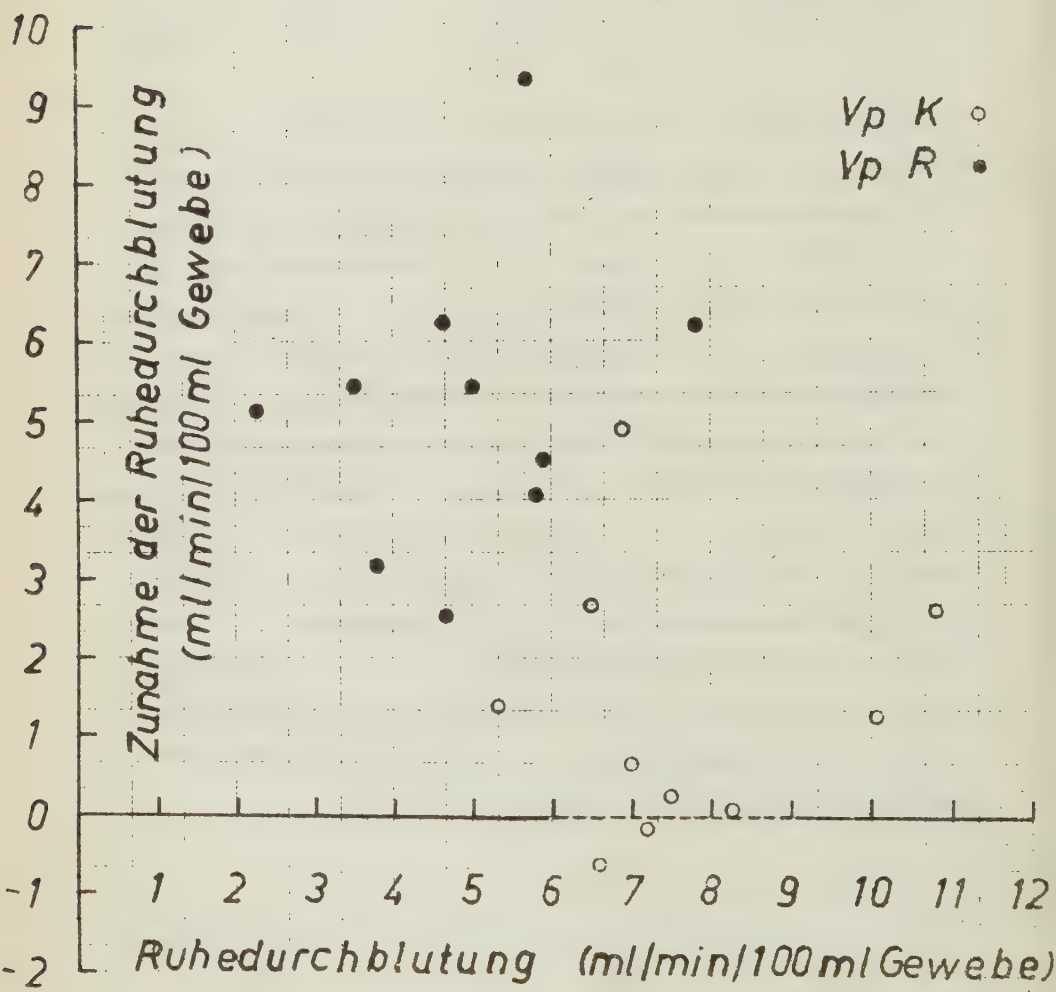
Messungsergebnis an Versuchsperson R in ml/min/100 cm³ Gewebe

Versuche	Durchschnitts- werte der Ruhe- durchblutung	Durschnittswerte der Durchblutung nach Muskularbeit	Zunahme der Durch- blutung nach Muskularbeit
15.12.61	2,28	7,45	+5,17
11.12.61	3,5	8,95	+5,45
17.11.61	3,82	6,97	+3,15
24.11.61	4,65	10,9	+6,25
23.11.61	4,68	7,25	+2,57
16.11.61	5	10,45	+5,45
28.12.61	5,73	15,05	+9,32
15. 1.62	5,84	9,9	+4,06
8. 2.62	5,9	10,4	+4,5
25. 1.62	7,8	14,0	+6,2

Vp.	Mittelwert der Ruhedurchblutung in ml/min/100cm ² Gewebe	Mittelwert der Arbeitsdurchblutg. in ml/min/100cm ² Gewebe	Durchblutungs- zunahme in ml/min/100cm ² Gewebe	
K	7,6	8,9	+ 1,3	= + 17 %
R	4,9	10,1	+ 5,2	= +106 %

Aus den Mittelwerten aller Versuche an beiden Versuchspersonen kann man folgern, daß die Durchblutungszunahme während gleicher Muskularbeit bei geringerer Ruhedurchblutung größer als bei höherer Ruhedurchblutung ist. Tatsächlich nimmt die Durchblutungszunahme während Muskularbeit mit steigender Ruhedurchblutung ab, wenn man die absoluten Werte (Mittelwerte eines Versuchstages) der Durchblutungsänderungen in Abhängigkeit von den absoluten Ruhedurchblutungswerten beider Versuchspersonen aufträgt (s. Abbildung 4). Bezüglich der an verschiedenen Tagen bei der einzelnen Versuchsperson ermittelten Werte kann die gleiche Folgerung wegen der starken Streuung der Versuchsergebnisse aber nicht gezogen werden d. h., aus den vorliegenden Versuchsergebnissen kann für die Einzelperson nicht geschlossen werden, daß die Durchblutungszunahme während gleicher Muskularbeit bei höherer Ruhedurchblutung geringer als bei kleiner Ruhedurchblutung ist.

Abb. 4. Zunahme der Ruhedurchblutung nach Muskelarbeit



Besprechung

Die sogenannte Ruhedurchblutung des Skelettmuskels, das ist die mit der Methodik der Venenverschlußplethysmographie gemessene Gesamtdurchblutung der Extremitätenmuskulatur, dürfte bei dem Menschen im allgemeinen überschüssig sein d. h., sie ist größer als dem augenblicklichen nutritiven Bedürfnis der zu versorgenden Muskulatur entspricht. Wir wissen heute, daß für den Grundumsatz der ruhenden Muskulatur etwa 0,5 - 1,0 ml/min/100 ml Gewebe benötigt werden (s. Schroeder, 1963). Diesen Wert findet man als unteren Grenzwert bei der Untersuchung der Muskeldurchblutung des gesunden, ruhenden Menschen. Diese Durchblutungsgröße ist offensichtlich für die nutritive Versorgung der Skelettmuskulatur vollkommen ausreichend. Bei den meisten Menschen findet man im allgemeinen aber Durchblutungswerte von 2 - 10 ml/min/100 ml Gewebe, Werte, die für die ruhende Muskulatur als "überschüssig" angesehen werden müssen. Auch in den eingangs zitierten Versuchen von Grosse-Brockhoff, Rein und Schoedel wurde eine "überschüssige" Ruhedurchblutung des Muskels nachgewiesen, weil dieselbe bis zu 40 % ohne Abfall der Muskelleistung (bei geringer Belastung) gedrosselt werden konnte.

Wodurch kommt es zu den unterschiedlichen Ruhedurchblutungenwerten oder der überschüssigen Durchblutung?

Verschiedene Autoren (Grant und Pearson 1938, Abramson und Ferris 1940, Wilkins und Eichna 1941 u.a.) haben nachgewie-

sen, daß die "Ruhedurchblutung" durch Affekte stark gesteigert werden kann. Diese Durchblutungssteigerungen werden zentral über cholinergische Nervenfasern ausgelöst, weil eine Blockade dieser Nervenfasern durch Atropin die affektiv ausgelösten Durchblutungssteigerungen abschwächt oder aufhebt (Blair und Mitarbeiter 1959, Barcroft und Mitarbeiter 1960).

Diese cholinergischen Nervenfasern gehören zum sympathischen Nervensystem und können durch Reizung bestimmter Teile des Zentralnervensystems, insbesondere des Hypothalamus, aktiviert werden (Eliasson, Folkow, Lindgren und Uvnäs 1951).

Da diese Gebiete zum retikulären Weckzentrum des Hirnstammes gehören, dürfte die Gesamtdurchblutung der ruhenden Skelettmuskulatur von der Aktivität dieser Gebiete abhängen.

(s. Schroeder, 1964) Jede psychische Erregung (insbesondere die "Notfallsituation") führt als Folge einer Aktivierung dieser Substrate zu gesteigerter Muskeldurchblutung. Hierbei handelt es sich aber um die Durchblutungssteigerung von Muskelgefäßen, die nicht am Stoffaustausch teilhaben (arteriovenöse Kurzschlußgefäße). Es läßt sich nämlich experimentell nachweisen, daß durch Erregung der cholinergischen, sympathischen Nervenfasern (der "Dilatatorennerven") der Kapillaraustausch trotz steigender Gesamtmuskeldurchblutung uneinflusst bleibt oder sogar abnimmt (Hyman und Mitarbeiter 1959, Rosell und Uvnäs 1962, Renkin und Rosell 1962). Auch die intravasale Zufuhr von Acetylcholin, dem Überträgerstoff der cholinergischen Nervenfasern, führt bei erhöhter Muskeldurch-

blutung zu einer Abnahme des aktiven Kapillarovolumens (Senkung des "integrierten Kapillardruckes", Schroeder 1961).

Wenn also bei ruhender Muskulatur ein Durchblutungswert ermittelt wird, der dem Grundumsatzwert von 1,0 ml/min/100 ml Gewebe wesentlich überschreitet, muß man annehmen, daß es sich um ein "überschüssiges" Stromvolumen handelt, welches nicht durch nutritive Kapillaren, sondern über Kurzschlußgefäße von den Arteriolen in die Venolen gelangt. Dieser Kurzschlußanteil, der im Affekt oder bei einer Notfallsituation besonders groß ist, dient der vorsorglichen Bereitstellung eines ausreichend grossen Stromvolumens, welches die Muskelversorgung während der zu erwartenden Tätigkeitssteigerung sichern soll (Eliasson und Mitarbeiter 1951, Folkow, Mellander und Öberg 1961, Schroeder 1964).

Steht nun jedes, den Ruhewert von 1 - 2 ml/min/100 ml Gewebe übersteigende Stromvolumen, das weiterhin als "Kurzschlußanteil" bezeichnet werden soll, der Muskulatur auch bei geringer Arbeitsbelastung zur Verfügung? Dies scheint aufgrund der eigenen Versuche der Fall zu sein, da die Durchblutungszunahme bei mittlerer Arbeitsleistung (30 - 40 % der Maximalkraft) mit zunehmender Ruhedurchblutung abnimmt (s. Abb. 4). Diese Aussage wird aber eingeschränkt durch die Tatsache, daß dieses Resultat nur auf der unterschiedlichen Reaktion der beiden Versuchspersonen beruht. Für die entsprechenden Werte jeder Versuchsperson konnte dagegen die gleiche Beziehung zwischen der Arbeits- und Ruhedurchblutung wegen der starken Streuung nicht

nachgewiesen werden. Die Untersuchungen waren absichtlich nur an zwei Versuchspersonen durchgeführt worden, um die vielleicht unterschiedliche Reaktionsweise verschiedener Versuchspersonen auszuschließen und um einen über viele Wochen möglichst gleichartigen Versuchsablauf, besonders bezüglich der Arbeitsbelastung, zu garantieren. Das Ziel der Untersuchungen, für eine einzelne Versuchsperson nachzuweisen, daß die Grösse der Arbeitsdurchblutung (bei mittlerer Belastung) von der Größe der durch zentrale Einflüsse unterschiedlichen Ruhedurchblutung des Skelettmuskels abhängt, konnte damit nicht erreicht werden. Für die beiden Versuchspersonen konnte aber nachgewiesen werden, daß bei stets niedriger Ruhedurchblutung die Arbeitsdurchblutung immer relativ groß und bei stets großer Ruhedurchblutung die Arbeitsdurchblutung stets relativ klein ist, ein Ergebnis, das selbstverständlich noch durch Versuche an einer größeren Anzahl von Versuchspersonen bestätigt werden müßte.

Aufgrund der stets charakteristischen Reaktionsweisen der beiden Versuchspersonen kann man aber annehmen, daß ein "überschüssiges" Stromvolumen (hoher Kurzschlußanteil) bei Muskelarbeit sofort den nutritiven Kapillaren zur Versorgung der tätigen Muskelfasern zur Verfügung gestellt wird, weil die Muskel-durchblutung bei hoher Ruhedurchblutung während der Arbeit nicht oder nur gering ansteigt. Je größer der Kurzschlußanteil ist, z. B. im Affekt oder bei einer Notfallsituation, um so früher kann also während einer eventuell plötzlich notwendigen Muskeltätigkeit die aerobe Energielieferung ermöglicht werden.

Zusammenfassung

Mit der von Schroeder entwickelten Methodik der Venenverschlußplethysmographie wurde an zwei Versuchspersonen die Durchblutung der Unterarmmuskulatur in Ruhe und bei mittlerer, stets gleicher Arbeitsbelastung im Verlauf von drei Monaten wiederholt gemessen, um die Abhängigkeit der Arbeitsdurchblutung von der Ruhe- (Grundumsatz) durchblutung zu untersuchen. Bei der Versuchsperson R. schwankte die Ruhedurchblutung zwischen 2,28 und 7,8 (Mittelwert 4,92) ml/min/100 ml Gewebe und die Arbeitsmehrdurchblutung zwischen + 2,57 und + 9,32 (Mittelwert 5,2) ml/min/100 ml Gewebe, bei der Versuchsperson K. schwankte die Ruhedurchblutung zwischen 5,35 und 10,8 (Mittelwert 7,62) ml/min/100 ml Gewebe und die Arbeitsmehrdurchblutung zwischen - 0,66 und + 4,90 (Mittelwert 1,3) ml/min/100 ml Gewebe.

Für die Mittelwerte beider Versuchspersonen ergab sich, daß die Arbeitsdurchblutung bei geringer Ruhedurchblutung (Vp.R) relativ groß und bei höherer Ruhedurchblutung (Vp.K) relativ klein war. Für die verschiedenen Untersuchungen bei den einzelnen Versuchspersonen konnte die gleiche Beziehung wegen der stark streuenden Durchblutungswerte nicht nachgewiesen werden. Die Ursache und die physiologische Bedeutung der unterschiedlichen Ruhedurchblutungswerte wurden diskutiert.

Literaturverzeichnis

ABRAMSON, D. I., and E. B. FERRIS: Responses of blood vessels in the resting hand and forearm to various stimuli.

Am. Heart J. 19, 541 - 553 (1940)

ABRAMSON, D. I., S. TUCK, A. M. ZAYAS, and R. E. MITCHELL: Effect of altering limb position on blood flow, O₂-uptake, and skin temperature.

J. Appl. Physiol. 17, 191 - 194 (1962)

BARCROFT, H., and O. G. EDHOLM: The effect of temperature on blood flow and deep temperature in the human forearm.

J. Physiol. 102, 5 - 20 (1943)

BARCROFT, H., and O. G. EDHOLM: Temperature and blood flow in the human forearm.

J. Physiol. 104, 366 - 376 (1946)

BARCROFT, H., and H. J. C. SWAN: Sympathetic control of human blood vessels.

London 1953

BARCROFT, H., J. BROD, Z. HEJL, E. A. HIRSJÄRVI, and A. KITCHIN: The mechanism of the vasodilatation on the forearm muscle during stress (mental arithmetic).

Clin. Sci. 19, 577 - 586 (1960)

BLAIR, D. A., W. E. GLOVER, A. D. M. GREENFIELD, and
I.C. RODDIE: The increase in tone in forearm resistance blood
vessels exposed to increased transmural pressure.

J. Physiol. 149, 614 - 625 (1959)

BRODIE, T. G., and A. E. RUSSEL: On the determination of the
rate of blood flow through an organ.

J. Physiol. 32, 47 - 49 (1905)

COOPER, K. E., O. G. EDHOLM, and R. F. MOTTRAM: The blood
flow in skin and muscle of the human forearm.

J. Physiol. (London) 128, 258 - 267 (1955)

DEAN, H. M., and S. L. SKINNER: The effect of increased
muscle blood flow on exercise hyperaemia in the human forearm.

Aust. J. exp. Biol. 38, 413 - 418 (1960)

DITTMAR, H. A.: Die Methoden der Volumen- und Verschluß-
plethysmographie.

III. Freiburger Kolloquium, München: Banaschewski 1961.

DORNHORST, A.C., and R. F. WHELAN: Blood flow in muscle
following exercise and circulatory arrest: influence of
reduction in effective local blood pressure, of arterial
hypoxia and of adrenaline.

Clin., Sci. 12, 33 - 40 (1953)

ELIASSON, S., B. FOLKOW, P. LINDGREN, and B. UVNÄS: Activation of sympathetic vasodilator nerves to the skeletal muscles in the cat by hypothalamic stimulation.

Acta Physiol. Scand. 23, 333 - 351 (1951)

FERRIS, B. G., R. E. FORSTER, E. L. PILLION, and W. R. CHRISTENSEN: Control of peripheral blood flow: Responses in the human hand when extremities are warmed.

Am. J. Physiol. 150, 304 - 314 (1947)

FOLKOW, B., S. MELLANDER, and B. ÖBERG: The range of effect of the sympathetic vasodilator fibres with regard to consecutive sections of the muscle vessels.

Acta Physiol. Scand. 53, 7 - 22 (1961)

GRANT, R. T., and R. S. B. PEARSON: The blood circulation in the human limb: observation on the differences between the proximal and distal parts and remarks on the regulation of body temperature.

Clin. Sci. 3, 119 - 139 (1938)

GROSSE-BROCKHOFF, F., H. REIN und W. SCHOEDEL: Über Zusammenhänge zwischen Muskeldurchblutung, O₂-Mangel, CO₂-Spannung im Blut und Leistungsfähigkeit des Muskels.

Pflügers Arch. 245, 593 - 603 (1942)

HEWLETT, A. W. and J. G. van ZWALUWENBURG: The rate of blood flow in the arm.

Am. Heart J. 1, 87 - 97 (1909)

HYMAN, Ch., S. ROSELL, A. ROSEN, R. R. SONNENSCHN, and B. UVNÄS: Effects of alteration of total muscular blood flow on local tissue clearance of radio-jodide in the cat.

Acta Physiol. Scand. 46, 358 - 374 (1959)

PATTERSON, G. C., and J. T. SHEPHERD: Effects of continuous infusions into brachial artery of adenosine triphosphate, histamine and acetylcholine on amount and rate of blood debt repayment following rhythmic exercise of forearm muscles.

Clin. Sci. 13, 85 - 91 (1954)

RENKIN, E. M., and S. ROSELL: Effects of different types of vasodilator mechanisms on vascular tonus and on trans-capillary exchange of diffusible material in skeletal muscle.

Acta Physiol. Scand. 54, 341 - 251 (1962)

REIN, H.: Lehrbuch der Physiologie des Menschen, Berlin 1942, 309 - 310

ROSELL, S., and B. UVNÄS: Vasomotor nerves activity and oxygen uptake in skeletal muscle of the anesthetized cat.

Acta Physiol. Scand. 54, 209 - 222 (1962)

ROSSBERG, G. und W. BAIER : Auswertung und Kritik endplethysmographischer Versuchsergebnisse.

Z. ges. exp. Med. 122, 129 - 141 (1953)

SCHROEDER, W. : Der physiologische Nachweis arterio-venöser Kurzschlüsse in der Skelettmuskulatur.

Pflügers Arch. 273, 281-287 (1961)

SCHROEDER, W. : Eine einfache Methode zur fortlaufenden Registrierung von Änderungen der Haut- bzw. der Muskeldurchblutung des Menschen und des wachen Hundes (Kapillardruckmessung).

Z. ges. exp. Med. 130, 513 -522 (1959)

SCHROEDER, W. Beschreibung und Ergebnisse einer neuen Methodik zur quantitativen Durchblutungsmessung der Extremitätenmuskulatur.

Z. ges. exp. Med. 137, 1 - 11 (1963)

SCHROEDER, W. : Was wissen wir über die vegetative Steuerung der Skelettmuskeldurchblutung ?

Acta Neurovegetativa 1964 (im Druck)

WILKINS, R. W. , and L. EICHNA : Blood flow to the forearm and calf. I. Vasomotor reactions: role of the sympathetic nervous system.

Bull. Johns Hopk. Hosp. 68, 425 - 449 (1941)

Herrn Professor Dr. Schroeder sage ich herzlichen Dank
für die Überlassung des Themas und für seine wertvolle
Unterstützung bei der Abfassung der Arbeit.

Mein Lebenslauf

Am 18. 12. 1936 wurde ich als Sohn des Dipl.-Ing. A. Huth und seiner Ehefrau Margarethe in Montabaur/Westerwald geboren. Mit 6 Jahren besuchte ich zunächst die Volksschule in Frankfurt a. Main, dann ab Herbst 1944 die Volksschule in Montabaur und von 1945 bis 1947 die Volksschule in Flörsheim a. Main. Von Herbst 1947 bis Ostern 1957 war ich Schüler des Realgymnasiums in Rüsselsheim a. Main, das ich mit bestandenem Abitur im März 1957 verließ. Im Mai 1957 begann ich das Studium der Zahnmedizin an der Frankfurter J. W. Goethe-Universität. Die Zahnärztliche Vorprüfung bestand ich im Juli 1959, das Zahnärztliche Examen im Juli 1962. Zur Zeit bin ich als Assistent in einer zahnärztlichen Praxis tätig.

Flörsheim/Main , den 25.1.1964

Reiner Huth

Verzeichnis meiner akademischen Lehrer :

Prof. Dr. J. v. Reckow	Zahn-Mund-Kieferkrankheiten
Prof. Dr. M. Kuck	Prothetik
Prof. Dr. P. Hauser	Operationskurs
Prof. Dr. J. Frey	Innere Medizin
Priv. -Doz. Dr. W. Ristow	Hals-Nasen-Ohrenheilkunde
Priv. -Doz. E. Landes	Haut- u. Geschlechtskrankheiten
Lehrbeauftragter Dr. Koller	Kieferorthopädie
Priv. -Doz. Dr. W. Weber	Chirurgische Poliklinik
Prof. Dr. J. Jürgens	Kurs der Klinischen Chemie
Priv. -Doz. Dr. E. Westermann	Pharmakologie und Toxikologie
Priv. -Doz. Dr. A. Kleinschmidt	Hygiene und Bakteriologie
Priv. -Doz. Dr. Sandritter	Spezielle Pathologie
Prof. Dr. K. Wezler	Physiologie
Prof. Dr. D. Starck	Anatomie
Prof. Dr. Felix	Physiologische Chemie
Prof. Dr. Ortmann	Histologie
Prof. Dr. Wieland	Organische Chemie
Prof. Dr. M. Czerny	Physik
Prof. Dr. P. Royen	Anorganische Chemie

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, daß ich die der Medizinischen Fakultät Frankfurt/Main zur Promotionsprüfung eingereichte Arbeit mit dem Titel

"Untersuchungen über die Abhängigkeit der "Arbeitshyperämie"

der Skelettmuskulatur des Menschen von der Ruhedurchblutung"

im Institut für animalische Physiologie der Universität Frankfurt/Main unter Leitung von Herrn Prof. Dr. W. Schroeder mit Unterstützung durch Herrn Prof. Dr. W. Schroeder ohne sonstige Hilfe selbst durchgeführt und bei der Abfassung der Arbeit keine anderen als die in der Dissertation angeführten Hilfsmittel benutzt habe.

Ich habe bisher an keiner in- und ausländischen Medizinischen Fakultät ein Gesuch um Zulassung zur Promotion eingereicht noch die vorliegende Arbeit als Dissertation vorgelegt.

Vorliegende Arbeit wurde in keinem Publikationsorgan veröffentlicht.

Flörsheim/M., den 25.1.1964

Rainer Huth



